

国外航空发动机核心机派生发展途径研究

孙露, 李茜*, 崔艳林

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘要: 航空发动机核心机技术长期以来一直受到世界各航空发动机企业的高度重视, 已成为发动机系列化发展的主要技术途径。系统梳理了国外航空发动机核心机研制计划, 以及各计划下所研制的系列核心机和发动机; 研究了美欧航空发动机领域标杆企业核心机的派生发展历程与现状, 总结出各企业核心机的发展途径及规律; 结合我国发动机的发展现状, 提出了核心机派生发展的相关建议。对我国加快航空发动机研制进程、保障其可靠发展具有重要的参考价值。

关键词: 航空发动机; 核心机; 派生发展; 技术途径; 系列化发展; 研制计划

中图分类号: V23 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620(2025)04-0085-07

DOI: 10.3724/j.GTER.20250051

Research on the derivative development of foreign core engines

SUN Lu, LI Qian*, CUI Yanlin

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: The core engine technology of aviation engines has long been highly valued by aviation engine companies around the world and has become the main technological approach for the development of engine series. A series of core engines developed under various foreign aero engine-related programs has been illustrated. The core engine development approaches and patterns were summarized based on the derivative development processes and status of foreign core engines. Based on the current development status of engines in China, relevant suggestions for the development of core engine derivatives have been proposed, which have important reference value for accelerating the research and development process of aviation engines in China and ensuring their reliable development.

Key words: aero-engine; core engine; derivative development; technology pathway; serialization development; development programs

1 引言

航空发动机核心机由高压压气机、燃烧室和高压涡轮部件集成。在核心机的基础上配装风扇、低压涡轮、加力燃烧室、控制系统、传动系统等, 即可研制出覆盖一定推力(功率)范围的航空发动机^[1]。核心机的技术水平直接决定了航空发动机整机产品的性能, 发动机性能的每一次重大跨越, 都离不开核心机性能的大幅提升。依托成熟、高性能、高可靠性

的先进核心机发展航空发动机, 能够较快形成覆盖一定推力(功率)范围的系列化产品, 大幅降低发动机研制技术风险和研制成本, 并缩短研制周期。因此, 核心机技术长期以来一直受到世界各航空发动机企业的高度重视, 已成为航空发动机系列化发展的核心技术基础, 而核心机系列化发展同样是当前国际先进航空发动机研发机构的通用做法。深入理解并掌握核心机的研制规律, 据此制定科学的策划

收稿日期: 2025-04-15

作者简介: 孙露(1986-), 男, 四川成都人, 高级工程师, 硕士, 主要从事航空发动机研究和管理。

通信作者: 李茜, 女, 重庆开州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事航空发动机科技情报研究。E-mail: 120575855@qq.com

引用格式: 孙露, 李茜, 崔艳林. 国外航空发动机核心机派生发展途径研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(4): 85-91. SUN Lu, LI Qian, CUI Yanlin. Research on the derivative development of foreign core engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(4): 85-91.

并完成部署,对我国加快航空发动机研制进程、保障其可靠发展具有重要的参考价值。

2 国外航空发动机核心机研制计划

国外航空发动机核心机研制以美国的技术和成果最具代表性。受20世纪50年代后期开始的“要导弹不要飞机”政策的影响,美国的航空发动机技术研究和费用被缩减到了历史最低水平,导致其技术水平和速度远落后于苏联^[2]。在此背景下,为降低型号研制的技术风险,美国在航空发动机技术的研发中增加了一个预先发展阶段,即在将技术研究成果应用于型号研制以前,尽可能地在接近发动机真实工作状态下进行试验和验证。

1959年,美国空军研究实验室正式向国防部提出优先发展高压压气机、燃烧室和高压涡轮3大关键部件的核心机发展思路,正式推出“轻重量燃气发生器”(LWGG)计划。在该计划取得初步成功后,美国国防部从1963年开始调拨专款予以支持,并将该计划更名为“先进涡轮发动机燃气发生器”(ATEGG)计划。ATEGG计划由美国空军管理,年度经费平均为3 000万~4 000万美元,主要支持18.00 kg/s级或更大流量的核心机及相关部件的设计、研制和验证工作,开发的技术可应用于大型涡扇和涡喷发动机。之后,美国国防部又启动了“联合涡轮先进燃气发生器”(JTAGG)计划,主要研究2.27~13.60 kg/s流量的核心机技术,应用于中小型发动机。美国国家航空航天局(NASA)在20世纪70年代开展的面向民用航空发动机技术的“高效节能发动机”(E3)计划也属于技术验证机和核心机相关计划^[3]。截至1988年“综合高性能涡轮发动机技术”(IHPTET)计划实施之时,ATEGG计划和E3计划的相关研究均并入IHPTET计划中,继续开展技术开发和核心机研制的工作。在IHPTET后续计划——“通用的、经济可承受的先进涡轮发动机”(VAATE)计划中,通用核心机成为重点研究的3大技术领域之一。由此可以看出,美国对核心机的研制是持续的、成系统的。

截至目前,美国已成功研发出多代核心机,每代核心机均在前代基础上改进发展,具有显著的连续性和继承性。经过长期的实践与探索,美国在核心机验证技术的积累中总结出了航空发动机技术“基础理论-部件-核心机-技术验证机-工程验证机-原型机”的发展途径和规律。借助核心机和技术验证

机这一关键环节,发动机的部件和系统技术能够在应用于型号研制之前即在真实发动机环境中得到充分验证,有效暴露潜在问题。通过不断改进,核心机不仅成为了先进技术的重要验证平台,更奠定了型号发展的坚实基础^[4-5]。

英国在20世纪70年代同样启动了发动机核心机研制计划。其技术路径首先是以阿杜尔发动机核心机为基础搭建高温验证装置,随后由罗尔斯·罗伊斯公司(简称罗罗公司)牵头,相继研制出RB199、RB211和V2500系列发动机^[6]。

3 国外航空发动机核心机派生发展途径

从20世纪60年代至70年代起,美欧航空发动机领域的标杆企业就开始采取核心机和验证机技术途径,解决飞机系统研制中发动机多部件匹配及自身系列化发展的关键问题,并获得了巨大成功,研制出一系列军、民用发动机。

3.1 美国GE航空航天公司(简称GE公司)

美国GE公司始终重视核心机的技术开发和验证工作,通过稳步提升核心机性能、增加技术储备,有效降低了研发风险。在ATEGG计划的推动下,GE公司成功研制出GE1、GE14、GE29和GE37等多代核心机,如表1所示。

在前3代核心机的基础上,GE公司成功研制出一系列军、民用发动机,如F101、F110、F404和CFM56。之后,GE公司以F101和F404发动机核心机为基础,派生发展了多型发动机,如图1、图2所示。

配装B-1轰炸机的F101-GE-100发动机,在其核心机基础上,少量改动了高压压气机静子的作动系统、放气系统和燃烧室机匣的后部构件,通过适应性改进风扇(2级→3级,直径1.14 m→0.97 m,压比2.0→3.2)、减小涵道比(2.01→0.87)、减小涡轮直径并提高转速、缩小加力燃烧室等,发展了配装F-16、F-15战斗机的F110-GE-100发动机,派生发展了配装B-2远程轰炸机的F118发动机^[7]。

F404发动机最初是20世纪60年代GE公司为F/A-18战斗机研制的小涵道比加力式涡轮风扇发动机,是在GE公司的第三代核心机GE23的基础上发展而来的^[8]。之后,基于F404基本型,少量改动燃油控制系统、喷管和燃烧室,派生发展了配装F/A-18飞机、A-4SU攻击机、X-47B舰载无人机、F-117A隐身轰炸机的F404系列发动机。

表1 GE公司核心机发展代次^[6]
Table 1 Core engine generations of GE

代次	年份	核心机代号	重点攻关技术	典型发动机型号
第一代	1963年	GE1	气冷涡轮温度1 573 K	TF38、CF6
第二代	20世纪70年代初至1975年	GE14	冲击式冷却涡轮,冷却芯套,涡轮导向叶片 3片铸成一体,变面积涡轮导向器	F101、F110、CFM56
第三代	1976年	GE23	瓦片式燃烧室,变面积涡轮导向器	F404
第四代	20世纪80年代	GE29	瓦片式燃烧室,整体叶盘,双合金叶盘, 可调涡轮冷却系统,定向凝固涡轮叶片	-
第五代	20世纪80年代末	GE37(XTC-45)	新轴系,变循环技术,冲压组合发动机, 高超声速运输机动力	F120
第六代	20世纪90年代	XTC-76	复合材料,无盘轮子	-
第七代	20世纪90年代末	XTC-77	高温材料,增材制造	-

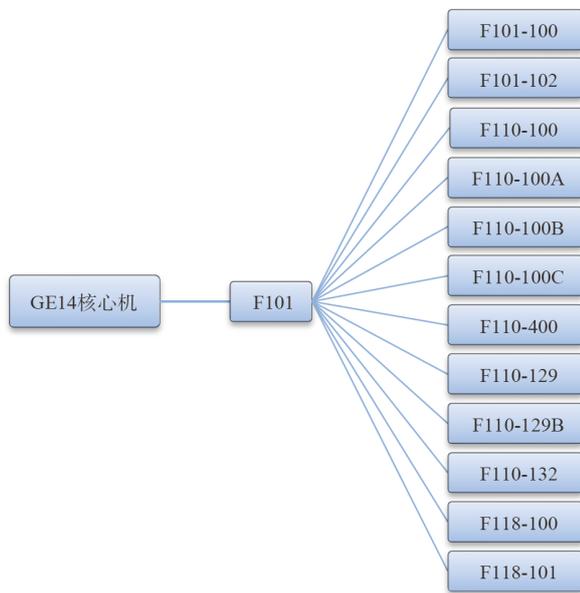


图1 F101发动机核心机派生发展示意
Fig.1 Schematic of derivative development based on the F101 core engine

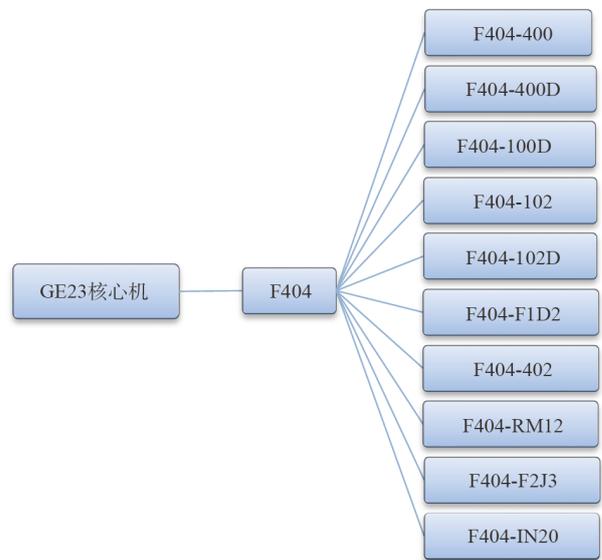


图2 F404发动机核心机派生发展示意
Fig.2 Schematic of derivative development based on the F404 core engine

GE公司的第四代核心机GE29于20世纪70年代末至80年代初开始研制,目标是配装下一代高马赫数战斗机。在该核心机上,GE公司验证了轻量化低成本压气机、轻量化瓦片式燃烧室、整体叶盘、可调涡轮冷却和隔热涂层等技术。在试验了2台核心机后,GE公司在GE29核心机的基础上又发展了第五代核心机GE37,验证了高温升双层壁火焰筒、多孔薄膜冷却单晶材料涡轮和对转涡轮设计等技术^[9]。

在军用核心机的基础上,GE公司开始了民用发动机的研制。如图3所示,GE公司以GE14核心机为基础,派生发展出CFM56-2、CFM56-3、CFM56-5、CFM56-7系列民用发动机。CFM56-2发动机于1979年服役,应用于DC80-70和B707等飞机。CFM56-3

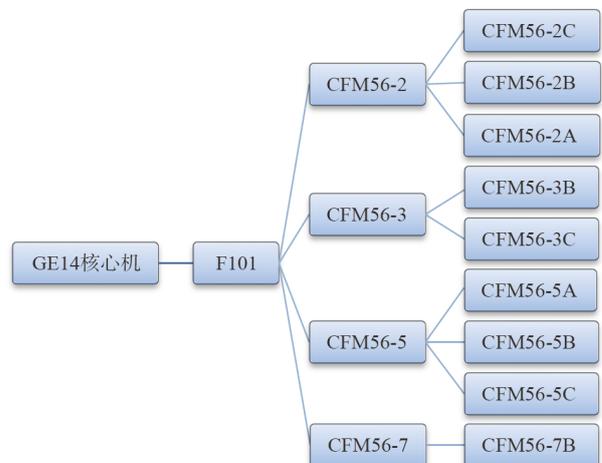


图3 CFM56发动机核心机派生发展示意
Fig.3 Schematic of derivative development based on the CFM56 core engine

发动机设计使用了增大尺寸的风扇和与风扇相匹配的增压级。CFM56-5A发动机参考CFM56-2和CFM56-3发动机设计经验,进一步增大风扇尺寸,优化了风扇、增压级、高压压气机和燃烧室的气动设计,并采用了第一代电子调节控制系统,耗油率较CFM56-3发动机降低了10%~11%。CFM56-5B发动机参照CFM56-5A发动机设计,改用双环腔低排放燃烧室,增压级改为4级。CFM56-5C发动机采用了与CFM56-5B发动机完全相同的核心机,并通过再次增大风扇进口直径,重新设计低压涡轮,采用混合排气方式和第二代电子调节控制系统,成为CFM56系列中推力最大的发动机,其耗油率较CFM56-3发动机降低16.2%。此外,GE公司在GE14核心机技术基础上,研制了CF34发动机——主要配装支线客机和喷气式商务/公务机的小型涡扇发动机。

从GE的实践经验来看,同一核心机可以衍生出适配不同应用场景的多种发动机产品,如F101发动机核心机衍生出了配装轰炸机的F101-GE-100发动机、配装战斗机的F110-GE-100发动机、配装远程轰炸机的F118发动机、配装民用客机的CFM56系列发动机^[10]。同时,同一核心机通过吸收新技术优化发展后,可以显著提升发动机产品性能。例如,CFM56-5系列在原核心机基础上应用大量新技术,使得CFM56-5比CFM56-2耗油率降低13%~15%,可靠性提高30%~40%;在GE90原型机基础上衍生GE90-94B时,通过改进设计三维气动高压压气机,使得推力提高了10%。

3.2 美国普拉特·惠特尼集团公司(简称普惠公司)

普惠公司在ATEGG等计划的推动下,研制出一系列核心机。通过核心机派生和优化发展,发展出了可满足多种飞机需求的系列发动机,同时为新一代高推重比发动机的研发奠定了坚实基础。普惠公司的核心机发展代次见表2。

表2 普惠公司核心机发展代次
Table 2 Core engine generations of PW

代次	年份	核心机代号	重点攻关技术	用于发动机型号
第一代	20世纪60年代末	STF200核心机	-	-
第二代	20世纪70年代	PW535核心机	高压压气机,高温涡轮技术,燃烧室优化	F100
第三代	20世纪70年代末	PW685核心机	-	F119和F135
第四代	20世纪80年代	PW699核心机	-	-
第五代	20世纪80年代末	XTC-65	高推重比技术,对转涡轮技术,高温材料应用	-
第六代	20世纪90年代	XTC-66	军用技术转化,材料与结构创新	-
第七代	20世纪90年代末	XTC-67	对转涡轮技术,高温材料与冷却系统,高压压气机优化	-

普惠公司首先在PW535核心机的基础上研制出F100发动机,之后派生发展了F100-220E、F100-220P、F100-229、F100-229A和F100-232等系列发动机,如图4所示。这些发动机所配装的F-15和F-16系列飞机至今仍是美国现役的主力战斗机。

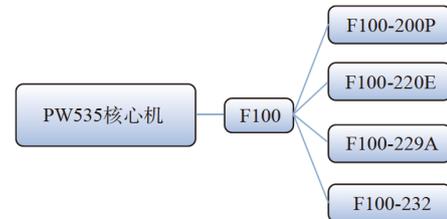


图4 F100发动机核心机派生发展示意
Fig.4 Schematic of derivative development based on the F100 core engine

在PW685核心机的基础上,普惠公司经过PW685、XF119、YF119等验证机平台的验证,研制出配装F-22战斗机的F119发动机;随后,又在F119发动机的基础上改型研制出了F135发动机,用于配装美国现役最新型的F-35战斗机。F119-100发动机核心机派生发展情况如图5所示。

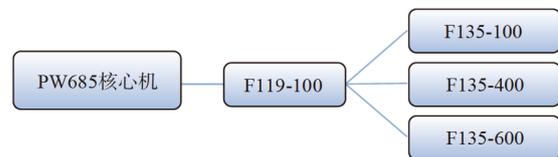


图5 F119-100发动机核心机派生发展示意
Fig.5 Schematic of derivative development based on the F119-100 core engine

在XTC-66核心机的基础上,普惠公司研制出了XTE-66发动机。XTE-66是F119发动机推力增大型的验证机,也是普惠公司论证下一代战斗机发动机PW7000的技术验证机,其推重比较F119发动机提

高50%。同时,XTC-66也是民用发动机PW6000和PW8000的核心机。XTC-66核心机派生发展情况如图6所示。

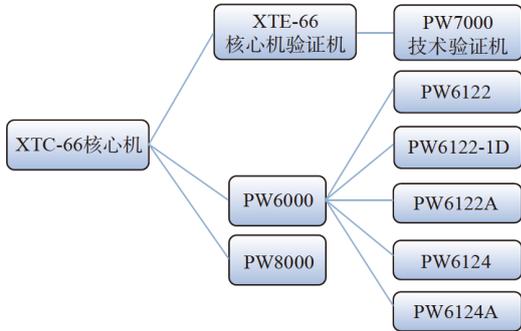


图6 XTC-66核心机派生发展示意
Fig.6 Schematic of derivative development based on the XTC-66 core engine

从普惠的实践经验来看,预研计划是核心机诞生的源头。例如,F100、F117和F119发动机均由ATEGG计划诞生的核心机衍生而来。同时,同一核心机通过吸收新技术优化发展后,可以推动发动机产品性能提升^[10]。例如,XTE-66发动机验证机由XTC-66核心机发展而来,而XTC-66核心机是在F119发动机的JTF16核心机基础上改进的成果,该验证机的推重比较F119发动机提高50%。

3.3 英国罗罗公司

英国在借鉴美国经验的基础上,由政府 and 罗罗公司联合出资启动了核心机研制计划,成功研制出RB199、RB211等发动机。此后,罗罗公司以RB211-22的核心机为基础,相继研制出RB211-524和RB211-535发动机。而后,又分别在这两款发动机的核心机基础上进一步发展出系列发动机,如图7所示。

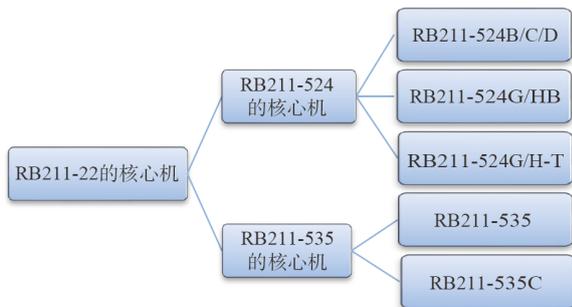


图7 RB211-22发动机核心机派生发展示意
Fig.7 Schematic of derivative development based on the RB211-22 core engine

罗罗公司的遛达系列发动机同样采用核心机优化发展途径研制而成。1988年,罗罗公司在RB211-524发动机基础上进行深度改进,研发出全新的Trent700系列发动机,其推力、耗油率等性能指标较RB211系列发动机均实现大幅提升。1993年,在Trent700发动机的基础上,通过增大风扇直径、空气流量、涵道比及提高总压比与部件效率,进一步研发出Trent800发动机,应用于B777飞机,其推力、耗油率等性能指标较Trent700发动机又有较大幅度提升^[11]。2000年,采用Trent700发动机的风扇,配装0.8倍缩比的Trent800发动机的核心机,同时提高核心机部件效率,成功研发出Trent500发动机,应用于A340-500/-600客机,其耗油率较Trent700发动机降低约7.5%。Trent8104发动机虽然没有投入服役,但其全新设计的风扇具备优异的性能。Trent900发动机采用Trent8104发动机的风扇与经过放大的Trent500发动机的核心机,在提高部件效率的同时,耗油率较Trent700发动机降低约4%、推力增大约18%,应用于A380客机^[12]。为满足B787-9客机的需要,Trent1000发动机在Trent900发动机的基础上缩小尺寸,同时进一步增大涵道比,使得耗油率较Trent900发动机下降约5%。最新型Trent XWB发动机的装机对象为A350客机,其在Trent1000发动机的基础上优化部件设计、增大风扇进口尺寸,同时将中压涡轮改为2级、低压涡轮改为6级,进一步提高核心机部件效率,耗油率水平与Trent1000发动机基本持平^[13]。

M250系列发动机最初由美国艾利逊公司研发生产,该公司后被罗罗公司收购。60年来,M250系列发动机以同一核心机为基础,发展出I、II、III和IV 4个系列核心机^[14],并在此基础上派生出涡轴、涡桨两类发动机(图8),输出功率覆盖184~526 kW。其中,民用涡轴型编号为M250-C,军用涡轴型编号为T63或T703,涡桨型编号为M250-B。罗罗公司收购艾利逊公司后,仍在持续对M250系列发动机进行改进。目前,全球现役M250发动机已达15 000台,超过100种飞机装配了该型发动机。

从罗罗公司实践经验来看,同一核心机能够衍生出适配不同应用场景的多种发动机产品。例如,M250与RB211-2的核心机均派生出了数十种满足不同需求的发动机;同时,同一核心机通过吸收新技术优化发展后,可以推动发动机产品性能提升,例如

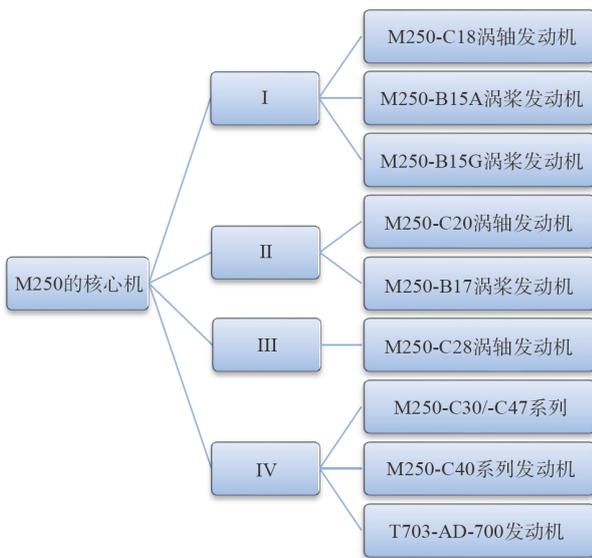


图8 M250发动机核心机派生发展示意
Fig.8 Schematic of derivative development
based on the M250 core engine

经核心机优化发展后的Trent900发动机,其耗油率较Trent700发动机降低约4%、推力增大约18%^[15]。

4 结论与建议

综合对国外航空发动机核心机派生发展途径的研究及对比分析,可以得出如下结论与建议:

(1) 在预研计划下诞生的核心机是发动机产品研制的基础和源头。表明预先研究的投入在发动机产品研制过程中处于首要地位。从技术路径上讲,利用预先研究阶段已验证的先进部件与技术来构建核心机,做好先期技术与集成验证,可在进入产品研制阶段后,快速将技术成果转化为最终型号产品。

(2) 根据不同的市场及客户需求,通过匹配相应部件与系统,同一核心机能够快速、低成本、低风险地派生出一系列航空发动机产品。这种做法可以有效控制研发风险、缩短研制周期、降低开发成本,进而实现投入收益的最大化。

(3) 核心机持续融入新技术,持续优化发展,是拓宽发动机谱系与推动性能升级的内驱力。在产品需求的牵引及创新技术的加持下,核心机自身不断迭代升级,持续突破原有性能极限。核心机的每一次升级发展,均建立在扎实的技术基础与产品长期运行经验的累积之上,通过长期积淀形成技术优势,从而降低技术跨代风险。因此,坚持核心机优化发展,是当前形势下实现高质量自主研发的有效途径。

(4) 基于核心机的产品系列化发展路径,是经过实践验证的航空发动机研制规律。国外标杆企业多遵循这一发展规律,成功研制出多型发动机产品。为加快发动机产品研制进程,需从作战或市场需求出发,重点开展基于核心机的发动机派生发展研究——特别是针对已有或在研核心机的发动机派生发展研究,推动新技术进口转化为产品;同时,需结合新需求开展新核心机的研发与设计,通过与与时俱进的灵活发展模式,持续完善技术布局。

参考文献:

- [1] 方昌德. 国外航空涡轮发动机核心机和验证机的途径和实践[R]. 北京:中国航空信息中心,1993.
FANG Changde. The development and application of foreign gas turbine core engines and demonstrators[R]. Beijing: Aeronautic Information Center of China, 1993. (in Chinese)
- [2] 江和甫,黄顺洲,周人治. “系列核心机及派生发展”的航空发动机发展思路[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004,17(1):1-5.
JING Hefu, HUANG Shunzhou, ZHOU Renzhi. Ieda of aero-engine development by “core-engines in series and derivation”[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] 韩玉琪,董芑呈,王翔宇. 核心机技术发展研究[J]. 航空动力, 2021, (1): 33-35.
HAN Yuqi, DONG Pengcheng, WANG Xiangyu. Research on the core engine technical development[J]. Aerospace Power, 2021, (1): 33-35. (in Chinese)
- [4] 吴大观. 浅论核心机与验证机的相互关系[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1995, 8(4): 58-60.
WU Dagan. Discussion on the relationship between core engines and demonstrators[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1995, 8(4): 58-60. (in Chinese)
- [5] 索德军,邹迎春. GE公司民用航空发动机发展战略[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 85-90.
SUO Dejun, ZOU Yingchun. Development strategies of civil aeroengine of GE Company[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 85-90. (in Chinese)
- [6] JARVIS A F. XG40-advanced combat engine technology demonstrator programme[R]. ASME 88-GT-300, 1988.
- [7] 方昌德. 综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划跟踪研究[R]. 北京:中国航空信息中心,1996.
FANG Changde. Reaearch on the integrated high

- performance turbine engine technology program[R]. Beijing:Aeronautic Information Center of China,1996. (in Chinese)
- [8] 黄顺洲,王永明,江和甫. 核心机及其派生发动机发展的方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2005,18(2):1-5. HUANG Shunzhou,WANG Yongming,JIANG Hefu. An investigation on core engine and its derived aero-engine development[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2005,18(2):1-5. (in Chinese)
- [9] 索德军,孙明霞,梁春华,等. 美国战斗机发动机技术研究及产品研制的发展特点及趋势分析[J]. 航空发动机,2016,42(6):82-89. SUO Dejun,SUN Mingxia,LIANG Chunhua,et al. Review on technical investigation and product development of fighter engine in US[J]. Aeroengine,2016,42(6):82-89. (in Chinese)
- [10] 彭友梅. 核心机和验证机—航空动力研究与发展中必不可少的重要阶段[J]. 燃气涡轮试验与研究,1991,4(3):73-78. PENG Youmei,Core engines and demonstrators-an indispensable stage on aero engine research and development[J]. Gas Turbine Experiment and Research,1991,4(3):73-78. (in Chinese)
- [11] 王天一,赵 鑫,包 宇. 核心机试验机设计技术研究[C]//2015年第二届中国航空科学技术大会论文集. 北京:中国航空学会,2015:290-292. WANG Tianyi,ZHAO Xin,BAO Yu. Design techniques of the core engine testing machine[C]//Proceedings of the 2nd China Aerospace Science and Technology Conference in 2015. Beijing:Chinese Society of Aeronautics and Astronautics,2015:290-292. (in Chinese)
- [12] MAHAN JR,KARCHMER A. Combustion and core engine[R]. NASA,1991.
- [13] 章 弘. CF34系列涡扇发动机介绍及发展历程[J]. 民用飞机设计与研究,2010,(1):58-60. ZHANG Hong. Introduction on CF34 series engine and their development processes[J]. Civil Engine Design and Research,2010,(1):58-60. (in Chinese)
- [14] 吴大观. 关于先进核心机研制的几点意见[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003,16(1):5-6. WU Dagan. Comments on advanced core engine development[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2003,16(1):5-6. (in Chinese)
- [15] 韩玉琪. 罗罗公司遑达发动机发展及升级分析[J]. 航空动力,2025,(2):25-27. HAN Yuqi. Development and upgrade analysis of Rolls-Royce's Trent aero engine[J]. Aerospace Power,2025,(2):25-27. (in Chinese)